第 40 卷　第 2 期
2022 年 6 月

天　文　学　进　展
PROGRESS IN ASTRONOMY

Vol. 40,　No. 2
June., 2022

doi: 10.3969/j.issn.1000-8349.2022.02.02

天文观测对中子星内部结构的可能约束

许　妍[1,2,3]

(1. 中国科学院 国家天文台 长春人造卫星观测站，长春 130117；2. 中国科学院 国家天文台，北京 100101；
3. 中国科学院大学 天文与空间科学学院，北京 100049)

摘要： 深空脉冲星探测是约束中子星物态方程和理论模型的一个关键因素。尤其是奇特脉冲星及其系统，如亚毫秒脉冲星、双中子星和中子星-黑洞系统等的探测有望推动恒星演化理论、中子星物态方程和理论模型的革新。主要回顾了脉冲星宏观性质观测，包括脉冲星自转速度、质量、引力红移、转动惯量和引力波探测；介绍了约束中子星内部结构方面取得的一系列研究进展。

关　键　词： 中子星；中子星内部结构；物态方程；天文观测

中图分类号： P145.6　　　　**文献标识码：** A

1　引　言

银河系大约有 1.2×10^5 颗中子星，多数中子星在观测上都表现为脉冲星[1−3]。脉冲星观测属于多波段观测，其涵盖了从射电、红外线、光学、紫外线、X 射线到伽马射线波段及甚高能部分的星体辐射[4]。澳大利亚国家射电望远镜中心 (Australia Telescope National Facility, ATNF) 目前已公布脉冲星仅有 3 320 颗，占中子星总数的一小部分。随着脉冲星搜寻和观测技术不断进步，人类将会发现越来越多的脉冲星。

中子星是恒星演化的最终产物之一，人们常常把中子星看做一个巨大的原子核，但是区别在于中子星是引力束缚或强相互作用下表面自束缚的致密天体，而原子核是依靠核力把核子紧紧地束缚在核内，核力的本质依然是强相互作用。实际上，中子星内部结构和物质成分目前尚不清楚，除早期被提出的由中子、质子、电子、μ 子物质组成的传统中子星外，科学家认为中子星还可能是由超子物质组成的超子星、夸克物质组成的夸克星、强子-夸克组成的混合星或奇子组成的奇子星。中子星内部结构的研究是当前中子星理论与观测研究中的难点问题，现阶段很难通过直接手段获得中子星内部结构的详细信息。

收稿日期： 2021-08-07；　**修回日期：** 2021-11-29
资助项目： 国家自然科学基金 (11988101)
通讯作者： 许妍，xuy@cho.ac.cn

物态方程 (equation of state, EOS) 是描述物质在一定物理条件下所属状态的热力学方程，是连接中子星内部结构和宏观性质的重要桥梁。中子星 EOS 给出星体内部压强和能量密度的关系，它包含了星体内部结构的大量信息。一旦中子星 EOS 被确定了，星体的质量和半径可以通过广义相对论效应下的流体静力学平衡方程 (Tolman-Oppenheimer-Volkoff, TOV 方程) 求出[5, 6]，表示为：

$$\frac{\mathrm{d}P(r)}{\mathrm{d}r} = -\frac{[P(r)+\varepsilon(r)][M(r)+4\pi r^3 P(r)]}{r(r-2M(r))} \quad , \tag{1}$$

$$\frac{\mathrm{d}M(r)}{\mathrm{d}r} = 4\pi r^2 \varepsilon(r) \quad , \tag{2}$$

其中，$\varepsilon(r)$ 和 $P(r)$ 分别表示中子星的能量密度和压强，$M(r)$ 表示中子星质量。

EOS 本质上依赖于夸克及其间的强相互作用，由于复杂的量子色动力学 (quantum chromodynamics, QCD) 所具有的低能非微扰效应使其不能做第一性原理的理论计算，需借助唯象或微观核多体模型，结合天文观测对星体宏观性质的限制进行研究。脉冲星宏观性质 (如星体转动、质量、半径、引力红移、引力波辐射等) 观测是中子星 EOS 和内部结构研究中最重要的天文观测约束。韩金林、李菂、李柯伽和王娜等人开展了一系列脉冲星搜寻、自转特性及辐射特征的基础研究，在国际上获得了极高的声誉[7−12]。申虹、左维、郑小平、范一中、陈列文、徐仁新和李昂等人对中子星 EOS 研究中许多基础问题进行了深入探索，取得了丰硕的成果[13−26, 28]。特别地，申虹等人[15]提出了国际上广泛用于天体物理计算的 Shen EOS，已纳入中子星核心中可能出现的超子等奇异强子的贡献，可在 EOS 公开网站①上获得；郑小平等人[16, 17]研究了核子退紧闭加热对夸克星热演化的抑制作用，以及 r 模不稳定性在中子星热演化中的作用等；来小禹等人[23]提出了奇子星模型，是一类新的夸克星模型，他们认为中子星物质的构成单元可能是类似强子的、带有奇异数的“夸克集团”；李昂等人[26, 27]利用 GW170817 限制了夸克星 EOS，指出 GW170817 可能起源于(超流) 夸克星，基于其潮汐形变观测限制了夸克间相互作用参数，并利用 GW170817 等多信使观测限制了中子星最大质量和奇异相变的临界密度。

第 2 章以脉冲星宏观性质观测 (包括脉冲星自转特性、质量测量、表面引力红移、转动惯量以及引力波探测) 为基础，以如何约束中子星内部结构为中心，对科学背景进行简单的回顾；第 3 章对本工作做简单的总结与展望。

2 脉冲星观测如何约束中子星内部结构

全球大型射电望远镜陆续投入使用，为新型和奇特脉冲星的自主观测和发现提供了有力保障。我国 500 m 口径球面射电望远镜 (Five Hundred Meter Aperture Spherical Radio Telescope, FAST)、未来将要建设的新疆奇台 110 m 射电望远镜、云南景东 120 m 射电望远

①https://user.numazu-ct.ac.jp/ sumi/eos/

镜等大口径射电望远镜的重要科学目标之一就是实现对未知类型脉冲星的探测, 诸如毫秒-亚毫秒脉冲星 (millisecond - submillisecond pulsars, MSP-SMSP)、中子星-黑洞 (neutron star - black hole, NS-BH) 等双星系统，验证引力波等[3, 29−31]。脉冲星作为射电望远镜探测的重要目标，其宏观性质观测与理论研究已经成为认识恒星演化、探索中子星内部结构和奇异物质成分以及致密星体形成与演化等基础科学问题的重要途径。

2.1 脉冲星自转特性

脉冲星自转特性是其他相关研究的基础，其中脉冲星自转周期 P 及其时间导数 $\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}t}$ 一般通过天文观测可直接获得。脉冲星根据演化历史和自转周期的大小分为常规脉冲星和毫秒脉冲星 (millisecond pulsars, MSPs)。常规脉冲星自转周期的量级一般为秒，毫秒脉冲星一般指自转周期在 30 ms 以下的脉冲星。1967 年，人类观测到第一颗常规脉冲星 PSR B1919+21，$P = 1.34$ s；1982 年，人类观测到第一颗毫秒脉冲星 MSP B1937+21, $P = 1.56$ ms；2018 年 4 月 18 日，我国大型射电望远镜 FAST 首次发现毫秒脉冲星 MSP J0318+0253，$P = 5.19$ ms，并得到国际认证；2006 年，Hessels 等人使用绿岸射电望远镜在球状星团 Terzan 5 中发现了自转频率为 716 Hz 的 MSP J1748−2446ad ($P = 1.40$ ms)，它是迄今为止发现的自转速度最快的毫秒脉冲星。如果 MSP J1748−2446ad 的质量小于 2 $M_\odot$ ($M_\odot$ 表示太阳质量)，那么通过其自转速度可以得到它的半径应该小于 16 km。目前，MSP J1748−2446ad 可用于限制中子星自转频率上限。由于 MSP J1748−2446ad 的通量密度非常低，且日蚀率很高 (约为轨道的 40%)，导致对其探测难度很大，这暗示可能存在自转速度更快的脉冲星，即亚毫秒脉冲星 (submillisecond pulsars, SMSPs)[32, 33]。

亚毫秒脉冲星是指自转周期小于 1 ms 高速旋转的中子星，是 FAST 巡天关键的科学目标之一，因其具有解决脉冲星本质上是中子星还是夸克星争议的潜力，或者因其能够验证中子星内部是否存在大量夸克物质，已成为天体物理学领域的研究热点。1998 年，Madsen[34] 就对亚毫秒脉冲星可能是夸克星展开过理论研究；1999 年 10 月，美国航空航天局 (National Aeronautics and Space Administration, NASA) 的罗西 X 射线时变探测器最早探测到中子星小质量 X 射线双星 (low-mass X-ray binary, LMXB) XTE J1739−285[35]；2007 年 Kaaret 等人[36] 和 Zhang 等人[37] 报道其每秒旋转 1 122 次，$P = 0.89$ ms；而 2020 年 2 月和 3 月，Bult 等人[38] 观测后并没有发现它具有 1 122 Hz 自转频率，由此他们得出结论，XTE J1739−285 不可能具有亚毫秒级的自转周期；2004 年，Han 等人[39] 使用 Parkes 64 m 射电望远镜对亚毫秒脉冲星进行搜索，结果没有探测到这类天体；2009 年，Du 等人[40] 还对亚毫秒脉冲星的形成机制和可能的探测方法进行过深入的研究；2019 年，Han 等人[41] 基于 FAST 关键科学研究项目，设计了 FAST 银道面脉冲星快照跟踪巡天 (galactic plane pulsar snapshot survey, GPPS survey) 观测模式。相比之前最灵敏的美国阿雷西博 L 波段馈源阵列脉冲星巡天 (pulsar arecibo l-band feed array survey, PALFA survey)，GPPS 巡天灵敏度总体而言要高约一个数量级。截止目前，FAST 在运行不到 2 a 的时间内已发现约 500 颗脉冲星。随着 FAST 及全球射电望远镜探测能力的精准提高，关于亚毫秒脉冲星这类奇异星体的认证相信很快将会实现。

2.2 脉冲星质量测量

4 颗质量约 2 $M_\odot$ 的脉冲星—— PSRs J1614−2230 (P = 3.15 ms), J0348+0432 (P = 39 ms), J0740+6620 (P = 2.89 ms) 和 J2215−5135 (P = 2.61 ms) 的相继发现，为大质量中子星的存在提供了强有力的证据[42−46]。此外，2019 年，美国激光干涉引力波天文台 (Laser Interferometer Gravitational-wave Observatory, LIGO)/位于意大利的室女座干涉仪 (Virgo interferometer, Virgo) 发现双星合并引力波信号 GW190814，认为其中应该包含质量为 2.5 $M_\odot$ ∼ 2.67 $M_\odot$ 的致密星，它是一颗大质量中子星或者是一颗小质量黑洞[47, 48]。2021 年，Logoteta 等人[49]利用量子多体理论 Brueckner-Bethe-Goldstone 在 Brueckner-Hartree-Fock 近似下的有限温度扩展，计算了非旋转前中子星 (protoneutron stars, PNSs) 的结构性质；并提出了一种产生小质量 (约为 2 $M_\odot$) 黑洞的可行机制，对于解释双星合并事件 GW190814 可能是 BH-BH 合并这一机制具有重要意义。由于引力波探测并没有揭示 GW190814 事件中致密星的性质，而无论这颗致密星是中子星还是黑洞，都将对中子星理论模型产生约束。

脉冲星质量的精确测量是约束中子星 EOS 的有效方法。但是脉冲星质量测量很具挑战性，通常是对双星系统，诸如双中子星系统 (double neutron star system or binary neutron star, NS-NS 或 BNS)、中子星-白矮星系统 (neutron star-white dwarf binary, NS-WD)、大质量 X 射线双星系统 (high mass X-ray binary, HMXB)、小质量 X 射线双星系统、中子星-主序星系统 (neutron star-main sequence star system, NS-MS) 等极端天体系统探测可获得脉冲星的质量测量值。目前，双星系统中的一小部分脉冲星已实现了质量测量；对于孤立中子星 (isolated neutron star, INS) 而言，至今中子星内部成分探测器 (neutron star interior composition explorer, NICER) 只公布一颗脉冲星 MSP J0030+0451 (P = 4.87 ms) 的质量测量值 (及其对半径的约束值)[50]。由于 NICER 进行的脉冲星质量测量在很大程度上依赖于积累的观测时间/数据、脉冲轮廓模型和光源的亮度，因此当下大多数孤立中子星的质量仍然不可测量。

然而，随着脉冲星测时、X 射线和光学天文观测的不断发展，过去几十年内具有可信测量质量的脉冲星数量不断增长，这使得统计上推断中子星质量分布特征成为可能。中子星质量分布包含了星体大量物理信息：中子星形成机理、通过质量吸积的致密双星演化以及星体 EOS 都在中子星质量分布上留下了明显的可观测特征。1999 年，Thorsett 和 Chakrabarty[51]回顾了射电脉冲星双星质量测量中的普遍问题。2005 年，Lattimer 和 Prakash[52]发现中子星的最大测量质量决定了可观测冷物质能量密度的上限，指出了目前和未来中子星质量测量的重要意义。2011 年，Valentim 等人[53]利用贝叶斯统计对各种系统中获得的 54 个测量点进行了研究，得到中子星的质量分布，并评估了他们所提出的高斯峰的可能性。2013 年，Kiziltan 等人[54]回顾了射电脉冲星的质量测量并给出详细调研，通过该调研可以对潜在的中子星质量分布进行严格的约束。2018 年，刘鹏等人[55]开展了中子星质量分布与形成方式的研究，对 63 对双星系统中的 72 颗中子星的测量质量做了统计研究，他们认为中子星可能有 Fe 核坍缩超新星爆发和电子俘获超新星爆发两种形成方式。同年，Alsing 等人[56]利用高斯混合模型对双星系统中中子星的质量分布做了统计，首次利用

贝叶斯模型给出了在中子星质量分布中存在多模态和最大质量截点的正面证据，其中具有可靠质量的中子星数量 74 颗；他们对最大中子星质量的推断能够对中子星 EOS 进行严格的约束。2020 年，Shao 等人[57]更新了 Alsing 等人的统计结果，具有可靠质量的中子星数量增加到 103 颗；采用不敏感于中子星 EOS 的方法，对 BNS 合并中形成超大质量中子星 (supramassive neutron stars, SMNSs) 的前景进行了研究；最终给出大质量中子星的统计特征，即较短周期、相对较弱的表面磁场、较老年龄且距离地球位置适中。

2.3 脉冲星引力红移

脉冲星的质量很难测量，特别是半径更难测量。因此，人们希望脉冲星的质量和半径之间存在某种关系。源于脉冲星表面辐射谱线的引力红移是与星体质量、半径都相关的物理量。相对于脉冲星半径，脉冲星质量易于测量。如果天文观测获得一颗脉冲星的质量和引力红移测量值，就可以用来计算这颗星的半径。因此，测量脉冲星表面辐射谱的引力红移已成为研究中子星 EOS 的探针[58–60]。广义相对论给出的星体的引力红移满足如下关系 (用几何单位时 $G = c = 1$)[61, 62]，

$$z = \left(1 - \frac{2M}{R}\right)^{-\frac{1}{2}} - 1 \quad . \tag{3}$$

结合 TOV 方程，可以获得星体表面引力红移值。

Tang 等人[63]在 2020 年提出了一种利用引力红移测量值来估计中子星质量的方法，即利用受引力波数据、核实验和非旋转中子星最大质量约束的 EOS 来推断孤立中子星的质量。在这种约束下的中子星 EOS 可以映射一系列通过求解 TOV 方程得到的质量-半径数据点，从而得到引力红移-质量的概率分布，最终求出给定引力红移情况下中子星的有效质量范围。他们利用该方法估计了伦琴卫星 (Roentgen satellite, ROSAT) 发现的“The Magnificent Seven” (M7) 中 3 颗热辐射射电宁静孤立中子星 RXs J1856.5−3754, J0720.4−3125 和 J1308.6+2127/ RBS 1223 的质量，发现可以达到相当高的精度，因此该方法对于构建孤立中子星的质量分布非常有益。2021 年，Sen 利用中子星物质有限温度 EOS 分析了温度对星体引力红移的影响，他的数值结果满足目前中子星最大的引力红移测量值的限制，其中目前中子星最大的引力红移测量值指 $Zs = 0.35$ (EXO 07482−676), $Zs = 0.12 \sim 0.23$ (1E 1207.4−5209) 和 $Zs = 0.205^{+0.003}_{-0.006}$ (RX J0720.4−3125)[65]。Sun 等人[64]根据普通和混合中子星微观核多体理论的 11 个 EOS，提出了在静态、一般转动和开普勒转动三种情况下的一组新的引力红移、转动惯量 (或角动量) 和引力结合能的准普遍关系，为研究中子星不可观测或难以观测的性质提供了新方法。

2.4 脉冲星转动惯量

研究表明，天文观测通过脉冲星测时可得到星体转动惯量，为星体 EOS 提供补充约束条件。具体来讲，双星系统中的相对论自旋轨道耦合引起进动，天文观测通过测量近星点进动速度可以获得转动惯量测量值，而进动的大小与双星系统的轨道周期和紧凑性紧密相关[66]。

在中子星内部结构模型中，星体转动惯量可通过求解爱因斯坦场方程获得，对于缓慢旋

转、轴对称的中子星，度规在球坐标下可以写成 (用几何单位时 $G = c = 1$)[67, 68]：

$$\mathrm{d}s^2 = -\mathrm{e}^{2\nu(r)}\mathrm{d}t^2 + \left[1 - \frac{2M(r)}{r}\right]^{-1}\mathrm{d}r^2 - 2\omega r^2 \sin^2\theta \mathrm{d}t\mathrm{d}\nu + r^2(\mathrm{d}\theta^2 + \sin^2\theta \mathrm{d}^2\nu) \quad , \tag{4}$$

一般用 J 和 $\varOmega$ 表示观测到的无穷远处惯性系的角动量和角速度，ω 表示局域惯性系的角速度。$\bar{\omega} = \varOmega - \omega$ 表示局域惯性系拖曳角速度，满足如下微分方程：

$$\frac{1}{r^4}\frac{\mathrm{d}}{\mathrm{d}r}\left[r^4 j(r)\frac{\mathrm{d}\bar{\omega}(r)}{\mathrm{d}r}\right] + \frac{4}{r}\frac{\mathrm{d}j(r)}{\mathrm{d}r}\bar{\omega}(r) = 0 \quad . \tag{5}$$

在中子星中心 $r = 0$ 和表面 $r = R$ 处，满足式 (5) 的边界条件是 $\bar{\omega}(0) = \bar{\omega}_c$ ($\bar{\omega}_c$ 取任意常数)，$\left.\frac{\mathrm{d}\bar{\omega}(r)}{\mathrm{d}r}\right|_{r=0} = 0$ 和 $\bar{\omega}(R) = \varOmega - \frac{2J}{R^3}$。

$j(r)$ 定义为：

$$\begin{cases} j(r) \equiv \mathrm{e}^{-\nu(r)}\sqrt{1 - 2M(r)/r} & (r \leqslant R) \\ j(r) = 1 & (r > R) \end{cases} \quad . \tag{6}$$

$\nu(r)$ 表示度规，满足如下方程和边界条件：

$$\frac{\mathrm{d}\nu(r)}{\mathrm{d}r} = \frac{M(r) + 4\pi r^3 P(r)}{r[r - 2M(r)]} = -\frac{1}{[P(r) + \varepsilon(r)]}\frac{\mathrm{d}P}{\mathrm{d}r} \quad , \tag{7}$$
$$\nu(R) = \frac{1}{2}\ln\left(1 - \frac{2M}{R}\right) \quad .$$

中子星的转动惯量可以写为：

$$I \equiv \frac{J}{\varOmega} = \frac{8\pi}{3}\int_0^R r^4 \mathrm{e}^{-\nu(r)}\frac{\bar{\omega}(r)}{\varOmega} \times \frac{[P(r) + \varepsilon(r)]}{\sqrt{1 - 2M(r)/r}}\mathrm{d}r \quad . \tag{8}$$

结合 EOS 与 TOV 方程，求解上述方程可以获得星体的转动惯量。

2001 年，李文飞等人[69]指出中子星的转动惯量较强地依赖于核物质的不可压缩系数与对称能强度系数，而对核子有效质量的关系不大，因此天文观测对脉冲星转动惯量的测量可用于约束核物质的不可压缩系数与对称能强度系数的取值，进而约束星体 EOS。2003 年，Bejger 和 Haensel 对蟹状星云脉冲星的转动惯量进行了研究，推断其下限为 (97 ± 38) $M_\odot\cdot\mathrm{km}^2$，并利用转动惯量与质量和半径之间的相关性粗略估计了蟹状星云脉冲星的质量和半径，结果取决于蟹状星云的质量[70, 71]。2005 年，Lattimer 和 Schute[72]估算了双脉冲星系统 PSR J0737−3039 中 A 星的转动惯量，指出经过几年的观测后该星转动惯量精度可达到 10% 左右，这将能够准确估计星体半径和 1 ~ 2 倍饱和密度附近星体的压强，并反过来将对中子星 EOS 及其内部物理提供强有力的约束。同时通过多个 EOS 的计算，Lattimer 和 Schute 给出了转动惯量与质量、半径相关的经验公式，即当 M/R 值约大于 0.07 $M_\odot\cdot\mathrm{km}^{-1}$ 时，星体转动惯量可以近似为：

$$I \simeq (0.237 \pm 0.008)MR^2\left[1 + 4.2\frac{M}{R} + 90\left(\frac{M}{R}\right)^4\right] \quad . \tag{9}$$

2010 年，赵先锋和张华[73]基于相对论平均场理论计算了考虑奇异介子情况下 PNSs 的转动惯量，指出奇异介子使得 PNSs 转动惯量降低。2018 年，Hong 和 Ren[74]基于相对论平均场理论，在考虑奇异介子情况下给出了大质量脉冲星 PSR J0348+0432 的转动惯量、引力红移的理论值。同年，Landry 和 Kumar[75] 利用引力波信号 GW170817 对中子星潮汐形变参量的限制推导出转动惯量与潮汐形变参量的关系式，并计算出 MSP J0737−3039A (P = 22.6 ms) 的转动惯量 $I = 1.15^{+0.38}_{-0.24} \times 10^{45}$ g·cm^2。2019 年，Lim 等人[76]在手征有效场理论和有限核物质性质约束下，基于核能密度泛函的贝叶斯分析计算出 MSP J0737−3039A 的转动惯量。MSP J0737−3039A 的质量测量值为 $(1.3381 \pm 0.0007)\ M_\odot$，在 95% 的置信度下其转动惯量在 $(1.04 \sim 1.51) \times 10^{45}$ g·cm^2 的范围内，最可能的值为 $I = 1.36 \times 10^{45}$ g·cm^2。他们指出，对位于 $(1.3 \sim 1.5)\ M_\odot$ 质量区间的中子星来说，其壳层对转动惯量的贡献约占总转动惯量的 1% ∼ 6%。假设以 10% 的精度对 MSP J0737−3039A 的转动惯量进行脉冲星测时测量，转动惯量与潮汐形变参数可以强烈地互相约束，并得到两者的近似函数关系，可以对中子星 EOS 的贝叶斯建模进行约束。

2.5　引力波探测如何约束中子星物态方程

引力波会引起所传播时空的变形，当引力波通过地球与脉冲星之间的时候，脉冲星发出的射电波所经过的路径就会被周期性地压缩和拉长，导致射电望远镜接收到的脉冲信号出现周期性地早到或延迟。对脉冲到达时间进行长期监测，就有希望捕捉到引力波信号。那么如何利用引力波信号来研究中子星内部结构呢？中子星就像其他天体一样，在外部潮汐场的影响下会发生形变。对于中子星内部结构研究而言，重要的引力波源主要来自 BNS、NS-BH 系统的合并信号[77−86]。从 BNS 或 NS-BH 系统后期的旋近、合并和衰荡引力波波形中可以提取描述其形变的无量纲参数 $\Lambda = (2/3)k_2(GM/c^2R)^{-5}$，它与 M, R 和 k_2 有关，k_2 依赖于 M/R 和 y_R。

y_R 需要求解如下微分方程[87]：

$$r\frac{\mathrm{d}y(r)}{\mathrm{d}r} + y(r)^2 + y(r)F(r) + r^2Q(r) = 0 \quad , \tag{10}$$

其中，$F(r), Q(r)$ 是 $\varepsilon(r)$, $P(r)$ 和 $M(r)$ 的函数，分别表示为：

$$F(r) = \frac{r - 4\pi r^3[\varepsilon(r) - P(r)]}{r - 2M(r)} \quad , \tag{11}$$

$$Q(r) = \frac{4\pi r\left(5\varepsilon(r) + 9P(r) + \dfrac{\varepsilon(r) + P(r)}{\partial\varepsilon/\partial P} - \dfrac{6}{4\pi r^2}\right)}{r - 2M(r)} - 4\left[\frac{M(r) + 4\pi r^3 P(r)}{r^2\left(1 - \dfrac{2M(r)}{r}\right)}\right]^2 \quad , \tag{12}$$

Love 数 k_2 表示为：

$$k_2 = \frac{1}{20}\left(\frac{2M}{R}\right)^5\left(1-\frac{2M}{R}\right)^2\left[2-y_R+(y_R-1)\frac{2M}{R}\right]\times \left\{\frac{2M}{R}\left[6-3y_R+\frac{3M}{R}(5y_R-8)+\frac{1}{4}\left(\frac{2M}{R}\right)^2\times \left[26-22y_R+\frac{2M}{R}(3y_R-2)+\left(\frac{2M}{R}\right)^2(1+y_R)\right]\right]+ 3\left(1-\frac{2M}{R}\right)^2\left[2-y_R+(y_R-1)\frac{2M}{R}\right]\times\ln\left(1-\frac{2M}{R}\right)\right\}^{-1} . \quad (13)$$

式 (10)–(13) 需结合 EOS, TOV 方程及边界条件 $y(0)=2$, $P(0)=P_c$, $M(0)=0$ 求解。因此，Λ 可用于对中子星 EOS、质量、半径、声速、引力红移、转动惯量等施加约束。

2015 年，Bauswein 和 Stergioulas[88] 指出，对于给定的 BNS 合并事件，他们的分类方案可以估算出双星总质量、黑洞的阈值质量以及中子星最大质量。2017 年，Chatziioannou 等人[89]研究了发生碰撞的中子星 EOS，得到的 EOS 约束是对旋近后期阶段发生碰撞的中子星潮汐形变测量的补充。2018 年，Zhu 等人[87]提出了一个夸克层次的中子星 EOS，即 QMF18 模型，它可以很好地描述来自自由空间核子、核物质饱和性质、大质量脉冲星和引力波信号 GW170817 的观测约束。2020 年，Kanakis-Pegios 等人[90]基于最近的 INS 和 BNS 系统观测数据的研究，提出了一种将 BNS 合并前潮汐形变测量与最大中子星质量和可能的声速上限联系起来的方法，即有效潮汐形变上限倾向于软 EOS，而大质量脉冲星质量的测量值倾向于硬 EOS；并在引力波信号 GW170817 和 GW190425 约束下利用声速来参数化中子星 EOS，指出未来的引力波探测可以更加严格约束中子星 EOS。2021 年，Tang 等人[91]基于引力波信号 GW170817, MSPs J0030+0451, J0437−4715和 4U 1702−429 的质量-半径观测数据，利用中子星唯象 EOS 模型进行贝叶斯参数推理，寻找中子星内潜在的一级相变。他们指出目前的观测数据仍然不足以支持/排除相变，因为有相变和没有相变的模型具有可比的证据。同年，Han 等人[92]还基于多信使数据提出了一种新的非参数方法 FFNN (feed-forward neural network) 来重构中子星 EOS。利用该方法分析了 GW170817 事件的质量-潮汐形变测量数据 (mass-deformability measurement)、NICER 公布的 MSP J0030+0451 质量测量值及其对半径的约束数据；对于正则中子星而言，给出在 90% 置信度下，$\Lambda_{1.4}=329^{+322}_{-163}$, $R_{1.4}=11.87^{+1.21}_{-1.06}$ km。同年，Xie 和 Li[93]基于 LIGO/Virgo 观测到的 GW170817, NICER 和 Chandra 望远镜已报道的正则中子星半径的天文观测数据，推断出描述致密富中子物质的一阶强子-夸克相变的后验概率分布函数 (probability distribution functions, PDFs) 和 9 个参数化的星体 EOS 相关性；同时分析了正则中子星内夸克物质 (quark matter, QM) 所占质量比重及星体半径，并预测了它们在更大质量中子星中的值；指出基于现有的天文观测数据以及理论和核物理实验约束的所有中子星 EOS，都可推导出在正则中子星内会形成大量的夸克物质。2021 年，Kanakis-Pegios 等人[94]首次研究了在中子星系统合并之前，温度对中子星潮汐形变能力和引力波信号的影响，指出即使在温度低于

1 MeV 情况下，其对潮汐形变的影响也不可忽略。

3 总结与展望

综上所述，奇特脉冲星及其系统和引力波未来探测对解决中子星内部结构研究中的难点问题至关重要。脉冲星宏观性质 (自转特征、质量、引力红移、转动惯量和引力波探测等) 观测是未来约束中子星物态方程和揭示中子星内部结构最重要的研究手段之一。如由于亚毫秒脉冲星拥有极高自转频率，因此在筛选中子星物态方程和验证快速转动中子星结构演变和作用机理中可能起到关键作用；通过对亚毫秒脉冲星宏观性质的研究，可以为其内部是否存在夸克物质，亚毫秒脉冲星质量范围是否与中子星、黑洞间可能存在的质量间隙有关等问题提供重要线索。通过对中子星最大质量进行限定，可以为其内部是否存在夸克物质，如果存在夸克物质其占星体质量的比重，中子星内是否存在强子-夸克相变等问题提供有效研究方案。奇特脉冲星及其系统的发现能够推动天文观测找到区分脉冲星是中子星还是夸克星的有效方法。引力红移测量为约束或估计中子星质量、半径等提供潜在方法，未来天文观测将获得更多的中子星发出的各波段的辐射，验证脉冲星引力红移将成为可能；未来引力波信号探测将提炼出更多的可用于约束脉冲星宏观性质的数据。此外，中子星-中子星或中子星-黑洞系统发生并合时，常伴有短伽马暴和千新星辐射现象，对它们的观测通过数值相对论模拟这个纽带，将会帮助我们限制中子星内部的物态，极大地促进我们对中子星内部结构的理解[95, 96]。关于短伽马暴和千新星对中子星内部结构的探讨，我们会在以后的研究工作中逐渐补充和完善。

相信未来脉冲星的搜寻和深空探测工作将推动脉冲星宏观性质作为约束中子星物态方程条件的研究。我们期盼奇特脉冲星及其系统的探测结果最终能够揭示中子星内部结构，进而为筛选中子星物态方程、提高中子星理论模型的准确性和可靠性提供有效的解决方案，实现理论模型和天文观测交叉检验的最佳模式。

参考文献：

[1] Tauris T M, Manchester R N. MNRAS, 1998, 298: 625
[2] Faucher-Giguère C A, Kaspi V M. ApJ, 2006, 643: 332
[3] 刘鹏, 王培, 李药, 等. 天文学进展, 2018, 36: 173
[4] Zhi Q J, Bai J T, Shang L H, et al. JHEAP, 2021, 32: 71
[5] Oppenheimer J R, Volkoff G M, Phys Rev, 1939, 55: 374
[6] Tolman R C. Phys Rev, 1939, 55: 364
[7] Luo R, Wang B J, Meng Y P, et al. Nature, 2020, 586: 693
[8] Lin L, Zhang C F, Wang P, et al. Nature, 2020, 587: 63
[9] Zhu W W, Li D, Luo R, et al. ApJ, 2020, 895: L6
[10] Lei Q, Pan Z C, Li D, et al. SCPMA, 2019, 62: 4
[11] Lu J G, Peng B, Xu R X, et al. SCPMA, 2019, 62: 14

[12] Zhang B. Nature, 2020, 587: 45
[13] Wang Y N, Shen H. PRC, 2010, 81: 025801
[14] Dong J M, Lombardo U, Zuo W. PRC, 2013, 87: 062801
[15] Shen H, Fan J, Hu J N, et al. ApJ, 2020, 891: 148
[16] Zheng X P, Zhou Xia, Yu Y W. MNRAS, 2006, 371: 1659
[17] Yang S H, Zheng X P, Pi C M, et al. MNRAS, 2010, 403: 2007
[18] Wen D H, Li B A, Chen L W. PRL, 2009, 103: 211102
[19] Zhang D R, Jiang W Z, Wei S N, et al. EPJA, 2016, 52: 142
[20] Zhen Y Z, Li A, Hu J N, et al. PRC, 2016, 94: 045803
[21] Xu Y, Huang X L, Zhang X J, et al. MNRAS, 2018, 474: 3576
[22] 李昂, 胡金牛, 鲍世绍, 等. 原子核物理评论, 2019, 36(1): 1
[23] 来小禹, 徐仁新. 物理, 2019, 48(9), 554
[24] Fan Y Z, Jiang J L, Tang S P, et al. ApJ, 2020, 904: 119
[25] Shao D S, Tang S P, Sheng X, et al. PRD, 2020, 101: 063029
[26] Zhou E P, Zhou X, Li A. PRD, 2018, 97: 083015
[27] Li A, Miao Z Q, Han S, et al. ApJ, 2021, 913: 27
[28] 徐仁新. 天文学报, 2021, 62(01): 10
[29] 南仁东. 中国科学: 物理学力学天文学, 2005, 35(5): 449
[30] 王娜. 中国科学: 物理学力学天文学, 2014, 44(8): 783
[31] 南仁东, 张海燕, 张莹, 等, 天文学报, 2016, 57(6): 623
[32] Hessels J W T, Ransom S M, Stairs I H, et al. Science, 2006, 311: 1901
[33] Urbanec M, Miller J C, Stuchlik Z. MNRAS, 2013, 433: 1903
[34] Madsen J. PRL, 1998, 81: 3311
[35] Markwardt C B, Marshall F E, Swank J H, et al. IAUC, 1999, 7300: 1
[36] Kaaret P, Prieskorn Z, in't Zand J J M, et al. ApJ, 2007, 657: L97
[37] Zhang C M, Yin H X, Zhao Y H, et al. PASP, 2007, 119: 1108
[38] Bult P, Altamirano D, Arzoumanian Z. ApJ, 2021, 907: 79
[39] Han J L, Manchester R N, Lyne A G, et al. https://arxiv.org/pdf/astro-ph/0310640.pdf
[40] Du Y J, Xu R X, Qiao G J, et al. MNRAS, 2009, 399: 1587
[41] Han J L, Wang C, Wang P F, et al. RAA, 2021, 21: 107
[42] Demorest P B, Pennucci T, Ransom S M. Nature, 2010, 467: 1081
[43] Fonseca E, Pennucci T T, Ellis J A, et al. ApJ, 2016, 832: 167
[44] Antoniadis J, Freire P C C, Wex N. Science, 2013, 340: 448
[45] Cromartie H T, Fonseca E, Ransom S M, et al. Nat Astron, 2020, 4: 72
[46] Kandel D, Romani R W. ApJ, 2020, 892: 101
[47] Godzieba D A, Radice D, Bernuzzi S. ApJ, 2021, 908: 122
[48] Fattoyev F J, Horowitz C J, Piekarewicz J, et al. PRC, 2020, 102: 065805
[49] Logoteta D, Perego A, Bombaci I. A&A, 2021, 646: A55
[50] Riley T E, Watts A L, Bogdanov S, et al. ApJ, 2019, 887: L 21
[51] Thorsett S E, Chakrabarty D. ApJ, 1999, 512: 288
[52] Lattimer J M, Prakash M. PRL, 2005, 94: 111101
[53] Valentim R, Rangel E, Horvath J E. MNRAS, 2011, 414: 1427
[54] Kiziltan B, Kottas A, De Yoreo M, et al. ApJ, 2013, 778: 66
[55] 刘鹏, 张洁, 支启军, 等. 天文学报, 2018, 59(3): 27
[56] Alsing J, Silva H O, Berti E. MNRAS, 2018, 478: 1377
[57] Shao D H, Tang S P, Jiang J L, et al. PRD, 2020, 102: 063006
[58] Zhao X F. ChJPh, 2020, 63: 240
[59] 喻传赞. 科学通报, 1980, 16: 50 (doi:CNKI:SUN:KXTB.0.1980-16-017)
[60] 陈家麟, 季沛勇. 上海大学学报 (自然科学版), 2013, 19(2): 176

[61] Lindblom L. ApJ, 1984, 278: 364
[62] Lackey B D, Nayyar M, Owen B J. PRD, 2006, 73: 024021
[63] Tang S P, Jiang J L, Gao W H, et al. ApJ, 2020, 888: 45
[64] Sun W J, Wen D H, Wang J. PRD, 2020, 102: 023039
[65] Sen D. JPhG, 2021, 48: 025201.
[66] Greif S K, Hebeler K, Lattimer J M, et al. ApJ, 2020, 901: 155
[67] Bao G, Engvik L, Hjorth-Jensen M, et al. NPA, 1994, 575: 707
[68] Worley A, Krastev P G, Li B A. ApJ, 2008, 685: 390
[69] 李文飞, 张丰收, 陈列文. 高能物理与核物理, 2001, 25(10): 1006
[70] Bejger M, Haensel P. A& A, 2002, 396: 917
[71] Bejger M, Haensel P. A& A, 2003, 405: 747
[72] Lattimer J M, Schutz B F. ApJ, 2005, 629: 979
[73] 赵先锋, 张华. 四川大学学报, 2010, 47(4): 825
[74] Hong B, Ren Z Z. CPC, 2018, 42: 084105
[75] Landry P, Kumar B. ApJ, 2018, 868: L22
[76] Lim Y, Holt J W, Stahulak R J. PRC, 2019, 100: 035802
[77] Daniel A G, Rossella G, David R, et al. PRD, 2021, 103: 063036
[78] Baiotti L, Rezzolla L. RPPh, 2017, 80: 096901
[79] Debojoti K, Ritam M, Prasad R, et al. 2021, arXiv:2104.00422v1
[80] Torres-Rivas A, Chatziioannou K, Bauswein A, et al. PRD, 2019, 99: 044014
[81] Lackey B D, Kyutoku K, Shibata M, et al. PRD, 2012, 85: 044061
[82] Lackey B D, Kyutoku K, Shibata M, et al. PRD, 2014, 89: 043009
[83] Kumar P, Pürrer M, Pfeiffer H P. PRD, 2017, 95: 044039
[84] Weih L R, Hanauske M, Rezzolla L. PRL, 2020, 124: 171103
[85] Radice D, Perego A, Hotokezaka K, et al. ApJ, 2018, 869: 130
[86] Radice D, Perego A, Bernuzzi S, et al. MNRAS, 2018, 481: 3670
[87] Zhu Z Y, Zhou E P, Li A. ApJ, 2018, 862: 98.
[88] Bauswein A, Stergioulas N. PRD, 2015, 91: 124056
[89] Chatziioannou K, Clark J A, Bauswein A, et al. PRD, 2017, 96: 124035
[90] Kanakis-Pegios A, Koliogiannis P S, Moustakidis Ch C. PRC, 2020, 102: 055801
[91] Tang S P, Jiang J L, Gao W H, et al. PRD, 2021, 103: 063026
[92] Han M Z, Jiang J L, Tang S P, et al. ApJ, 2021, 919: 11
[93] Xie W J, Li B A. PRC, 2021, 103: 035802
[94] Kanakis-Pegios A, Koliogiannis P S, Moustakidis Ch C. 2021, arXiv:2110.10270
[95] 俞云伟. 物理, 2019, 48(9): 581
[96] 周恩平. 物理, 2019, 48(9): 573

The Possible Constraints of Astronomical Observations on the Internal Structure of Neutron Stars

XU Yan[1,2,3]

(1. Changchun Observatory, National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Changchun 130117, China; 2. National Astronomical Observatories, Chinese Academy of Sciences, Beijing 100101, China; 3. School of Astronomy and Space Science, University of Chinese Academy of Sciences, Beijing 100049, China)

Abstract: The detection of deep space pulsars is a key factor that constrains the equation of states and the theoretical models of neutron stars. In particular, the process of observing the peculiar pulsars and their systems, such as sub-millisecond pulsars, binary neutron star systems, neutron star-black hole systems, etc., has played a very important role in understanding the evolution of stars and the true internal structure of neutron stars.

For example, the extremely high rotation frequencies of sub-millisecond pulsars may play a key role in constraining the equation of state of neutron stars and verifying the evolution of structure and mechanism in the rapidly rotating neutron stars. The researches of the macroscopic properties of sub-millisecond pulsars can provide important clues to whether quark matter can appear in sub-millisecond pulsars, and whether there is an association between the mass range of sub-millisecond pulsars and the possible mass gaps of neutron stars and black holes. The discovery of peculiar pulsars and their systems can promote astronomical observations to find the effective ways to distinguish neutron stars from quark stars. The measuring the surface gravitational redshift of neutron stars provides a potential method for constraining or estimating the mass and radius of neutron stars. The detection of the gravitational wave signal in future will extract more data that can be used to constrain the macroscopic properties of pulsars.

The article reviews the progress of research on the internal structure of neutron stars based on the latest astronomical observations, including how might the rotation speed, the mass, the gravitational redshift, the moment of inertia, and the detection of gravitational waves be used to constrain the equation of states and test the theoretical models of neutron stars.

Key words: neutron star; internal structure of neutron star; equation of state; astronomical observation